

电力企业调峰优化经济补偿机制分析

沈方¹(高级工程师), 高靖¹(高级工程师), 王涛¹(高级工程师),
王春生²(高级工程师), 李占军¹(高级工程师), 邓鑫阳¹

【摘要】在我国东北地区,热电企业追求利润最大化,导致热电企业非低出力运行,给电网公司调峰带来了较大压力,产生了大量“弃风”现象和清洁能源的浪费,同时增加了部分环保压力,因此从市场制度优化的角度解决热电机组非低出力运行问题势在必行。以辽宁省供暖电力企业为研究对象,基于博弈模型分析热电联产情境下的电力企业经济补偿机制,提出调峰激励机制,以实现电力企业的效益最大化。

【关键词】 博弈; 热电联产; 调峰; 低出力运行; 激励机制; 经济补偿

【中图分类号】 F427

【文献标识码】 A

【文章编号】 1004-0994(2019)05-0131-6

在我国北方地区,煤炭、石油以及风能资源较为丰富,发电设备以大型火电机组为主。北方冬季严寒,热负荷需求较大,装机机组大部分具备热电联产功能,这种方式可大幅度提高能源利用率,目前辽宁地区热电装机比重已接近七成。现实情况中,热电联产机组的运行工况受热负荷约束较大,主要由于目前往往采用“以热定电”的调度模式,热负荷仅由热电联产的热出力承担,确定了热负荷约束后,热电机出力随之确定,导致机组调峰能力下降。大量热电机因调峰空间有限、动力不足,造成采暖期上网电量大幅增加,致使电网调峰困难,大量风电、太阳能发电等新型清洁型能源被弃。“弃风”的大量存在从社会成本上来说,降低了资源配置的效率,同时增加了区域环保压力。

因此,如何从制度上协调热电企业调峰的动机、更大幅度地鼓励风电接入是学术界和实务界都在积极探索的现实问题。热电企业调峰和风电接入的本质是收益再分配的问题,本文运用博弈论的思想,对参与调峰的热电企业、风电企业及监管组织间的利益进行分析,从理论上探索电力企业调峰优化的补偿机制和路径。

一、电力企业经济补偿机制国内外研究综述

1. 热电企业调峰困难及对“弃风”的影响。随着

能源消耗、环境污染等社会问题的凸显,可再生能源发电比重越来越高。在我国北方,煤炭等资源较为丰富,原有发电设备以大型火电机组为主。近年来,在国家新能源战略的引领下,风电、核电及太阳能发电等方面发展迅速^[1]。风电、太阳能发电等出力具有随机性和波动性,增加了电网系统的不平衡和对调峰服务的需求,且平衡需求与风电渗透率呈现同向变化趋势,即系统所需的辅助服务呈现增加趋势^[2]。在以热电为主体的电网系统中,并网风电越来越多,给电网调峰带来了更大的压力,风电消纳问题也愈加突出。特别是在我国“三北”地区,“弃风”现象越来越严重^[1,2]。

制约风电消纳的主要瓶颈是系统调峰能力,为了弥补系统调峰能力的不足,诸多省网加强了调峰电源建设。北方“弃风”问题主要源于电网系统的调峰能力,特别是在冬季供暖期,热负荷需求大,“以热定电”的调度模式导致热电企业电产量增加,机组被迫增加出力^[3]。近年北方热电联产快速发展,热电联产发电量比重日益增加,无形中增加了峰荷电厂的调峰负担^[4]。大量热电联产机组非低出力运行,造成热电上网增加,地区风电被弃的比例不断提高。

2. 基于利益最大化的补偿机制探索。电网调峰困难和“弃风”现象存在的本质是不同发电主体间的

经济利益的二次分配^[5]。从博弈角度来看,每个企业都在追求自身利益最大化。近年来煤价上升,供暖价格固定,热电企业收益下降,倾向于隐瞒真实热负荷需求或虚报机组运行参数,通过多发电获得利润以弥补效益下降^[6]。影响热电机组运行中出力的因素主要包括热负荷制约、机组运行极限制约和能耗因素制约等,而非低出力运行的根本原因在于热电企业对利润的追求。北方冬季采暖用户供热属于民生工程,热电机组在满足热负荷需求的基础上,同时要考虑机组的稳定性与经济性。从调峰技术来看,可以通过热电机组停运解决“弃风”问题,当蒸汽通过减压降温用于供热时,热负荷低于最低稳燃条件下的供热,这会造成部分成本浪费^[7]。调峰效益可以通过风电节约的煤耗来估计,而调峰频度使旁路补偿供热,增加了设备损耗成本。也可利用蓄电池储能,通过不同时间段热能存储降低热电比,减少上网电功率,以达到对风能的消纳^[8]。

虽然从理论上可以通过低出力运行降低热电上网,但现实中由于对利润的追求,非低出力运行情况非常普遍。部分研究从经济效益和制度角度分析,认为通过风火交易,使用风力发电获取的利润对热电企业进行部分经济补偿,并制定制度合理分配利润,调动热电厂主动调峰的积极性,可在一定程度上减少“弃风”现象^[9]。为了突破热电机组“以热定电”的限制,可以综合考虑风电等新能源与热电的统筹协调,通过供热期火电机组的启停与配合为风电消纳提供空间^[10]。热电低出力与风电消纳的核心在于补偿机制的制度安排与利益分配范围^[11]。

虽然有关研究提出补偿机制以引导热电厂调峰来主动地解决风电消纳,认为通过补偿可以实现整体运营的经济性,但是对于如何对调峰进行补偿,尚未得到一致的方法。朱凌志等^[12]提出,可按照平均容量成本,通过因调峰减少的发电量损失确定补偿标准。张国强等^[13]对辅助调峰服务补偿机制进行设计,认为应针对热电企业深度调峰机组超过常规能力的比率和相应时间进行补偿,但未区分峰谷期的影响。陈建华等^[14]从大规模风电间歇特性兼顾电网运行的经济性与安全性方面考虑,建立风电功率预备与电力市场需求的关联模型,并进行计量分析。从当前的研究来看,对于如何降低热电联产出力水平、增加电网调峰空间还未有一致的方式。特别是热电联产中成本分摊方法不同,调峰成本计算不同,也造成经济补偿标准的差异较大。

二、热电联产非低出力运行的经济性分析

热电联产技术将发电过程中的余热用于供热,综合考虑产出,能够节约30%的能源投入,从而提高能源利用效率。由于经济总量制约电力总量消纳,热电联产机组“以热定电”的运行方式会导致上网电量增加,阻碍电网调峰。而东北的风力资源集中在冬季夜间时段,正是电负荷低谷时段和供暖高峰,几个因素错位导致电力负荷空间被热电机组占用,“弃风”现象更加突出。热电上网累加加剧了“弃风”“弃光”现象,当前北方“弃风”过高的原因在于“以热定电”约束导致被迫出力过高,解决“弃风”问题的关键在于降低热电机组的出力水平,并合理分配各热电联产机组的热负荷份额。

从整体经济性与社会整体利益分析,大规模“弃风”一方面导致了风电资源的极大浪费,另一方面热电大量上网又造成能源消耗与环境压力。解决风电消纳问题的核心在于多元主体利益分配机制的建立和健全,即考虑热电企业运营中的特殊性,运用多元主体参与和利益再分配的方式,通过弃风企业供电的部分收益弥补热电联产企业的低出力损失,以经济利益引导热电企业降低发电动机,减小调峰压力。以辽宁省为例,在经济放缓、电力需求和供电能力存在较大差距的背景下,热电联产导致“弃风”率提高,不利于总体电能经济效率,而热电比重过高也导致污染物排放等环境成本增加。辽宁省发改委颁布的《节能发电调度管理办法》明确规定了风能等可再生能源在各类发电机组中拥有第一发电优先级。因此,在综合考虑热电企业收益的同时,应考虑如何通过技术、政策手段为政府解决“弃风”过高问题。

从发达国家热电联产、消纳“弃风”的实践看,上述问题并非不可解决。如丹麦作为风电比重较高的国家(42%),其依靠完善的日前、日内电价报价体系,实现了风电、火电等多元供电方式的开放市场交易模式,并通过电价中较大比例的税费和补贴支持新能源发展,将弃风率降至0.2%。这表明通过灵活的经营利益动机激励,可以引导热电厂、电力运营商等多主体实现稳定运营,并保持较高的运营效率。因此,以利益动机引导为思路,运用博弈工具分析如何有效引导热电企业降低电出力积极性,减少发电量,进而解决风电消纳问题,具有研究价值。

三、热电联产低出力运行的制约因素及现实障碍分析

1. 交叉补贴效应。热电厂往往由多种不同类型

的热电联产机组组成,每个机组的型号、产出能力差异较大,要清晰界定热电厂的热电产能并非易事。在实际运行中,首先要保障供暖的持续安全,以供暖需求(即蒸汽量)供应为前提,而产生的电量不在电网调峰范畴(即优先安排热电机组电产)。热电联产实质上是热负荷与电负荷的合理分配问题,“以热定电”的模式是建立在能源效率考虑基础上的生产安排。但实际上,由于供暖属于民生工程,供暖价格较低且无法根据市场机制调整,政府对热电联产机组缺乏财政、税收等优惠扶持政策,通过热电交叉补贴方式对热电厂供暖进行弥补,加剧了热电企业增加电负荷的动机。而国家通过批复较高的上网电价进一步加剧了热电机组增加电产量的动机,给调峰带来更大压力。

2. 安全性与经济性。热负荷和热电机组运行的极限约束属于硬性约束,不可变动。从当前热电联产企业运行的模式看,其运行极限主要有投油稳燃极限和不投油稳燃极限,投油稳燃极限标志着机组运行的安全性,不投油稳燃极限标志着机组运行的经济性。热电联产机组能耗量主要由汽轮机的进气量决定,而汽轮机的进气量由机组承担的热负荷及电负荷决定,同时受凝气量的影响。为实现收益最大化,热电机组多按照能耗最小的目标安排生产。最小能耗生产方式能够为热电企业带来较高利润,但无法达到出力最小,无形中抬高了热电企业出力下限,造成上网电量增加。

3. 利益分配制度。当前热电联产机组非低出力运行造成“弃风”现象普遍存在,其直接原因是热电企业存在较强的追求利益最大化的动机,根本原因是众多相关组织间缺乏基于利益合理分配的制度安排。由于东北地区电源结构较单一,灵活调节电源比重低,热电企业可以通过低出力运行降低调峰压力,以吸纳更多的风电,节约能源。而风能的随机性、波动性导致电网公司调峰成本较高,吸纳风电意味着收益没有增加却增加了调峰成本压力和运行风险,导致其对吸纳风能缺乏利益动机,甚至会有意减少对风能的吸纳,提高自身收益。对于地方政府来说,煤电生产包括热电联产更具价格优势,且能够增加地方财政收入,其接收外省风电的动机不足。而发电机组发电量、上网电价由政府部门确定,不同企业间、机组间丧失灵活调节的动力,市场激励机制建设缺失也造成当前热电企业非低出力运行,并导致了“弃风”严重的现象。

四、热电企业调峰经济补偿的博弈分析

1. 热电企业与监审部门间的博弈分析。如上文所述,热电企业具有提高上网电量的动机,热电厂“以热定电”模式下并非最小出力,并且近年来热电联产快速发展,热电厂发电量积少成多,增加了电网调峰负担。以辽宁为例,热电联产企业数量多,规模、技术水平差异大,为监管部门监管带来了难度。监管部门由于专业和精力限制,很难对热电厂热、电产量进行准确监控,只能根据热电企业单方面提供的原始数据对最小运行进行估算。由于信息不对称和较高的监管成本,造成监管效果不佳。热电企业与监管部门之间的策略选择是典型的博弈问题,本文拟用博弈论的方法对其进行分析。

热电企业为了获取较高利润,倾向于违规增加电力供应,假设热电企业选择违规的概率为 $p(0 < p < 1)$,被监管部门监审到的概率为 $q(0 < q < 1)$ 。监管部门的监管是有成本的,被查出的热电企业需要支付相应的罚金。对于热电企业可选择“违规”和“不违规”两种策略;而监管部门可选择“监管”和“不监管”两种策略。基于以上两个主体构建混合策略博弈模型,具体可分为四种情况:①热电厂不违规而监管部门不监管,则热电企业收益为0,监管部门监管成本为0;②热电企业不违规同时监管部门监管,则监管部门监管成本为 C_a ,热电企业额外收益为0;③热电企业违规而监管部门不监管,则热电企业获取额外利润为 R_a ,监管部门的监管成本为0;④热电企业违规同时被监管部门监管,对热电企业采取 F_a 的惩罚,则热电企业收益为 $R_a - F_a$,监管部门监管成本为 C_a 。根据不同组合可得出如表1所示的混合策略博弈矩阵。

表1 监管部门—热电企业基于惩罚的混合博弈模型

监管部门收益 \ 热电企业收益		热电企业	
		违规(p)	不违规(1-p)
监管部门	监管(q)	$(R_a - F_a, F_a - C_a)$	$(0, -C_a)$
	不监管(1-q)	$(R_a, 0)$	$(0, 0)$

2. 监管部门—热电企业混合博弈的求解。根据表1可知,混合博弈的纳什均衡取决于各自的预期收益,现假设热电企业选择违规的预期收益为 P_{11} ,而不违规的预期收益为 P_{22} ,由表1可知:

$$P_{11} = q(R_a - F_a) + (1 - q)R_a = R_a - qF_a \quad (1)$$

而 $P_{22} = 0$,现假设 $P_{11} = P_{22}$,则可推导出 $q^* = R_a / F_a$ 。因此,当 $q = q^* = R_a / F_a$ 时,热电企业违规与否的收益

是相同的；当 $q^* < q$ 时，热电企业最优策略为“不违规”；而当 $q^* > q$ 时，热电企业最优策略为“违规”。监管部门在进行监审行为下预期收益设定为 S_{11} ，不进行监审情况下预期收益为 S_{22} ，则可知：

$$S_{11} = p(F_a - C_a) + (1-p)C_a = pF_a - C_a \quad (2)$$

同理可推出，当 $p^* > p$ 时，监管部门选择不监管更有利；而当 $p^* < p$ 时，监管部门选择监管更有利。

结合公式(1)、公式(2)可得出，当 $F_a < C_a$ 且 $F_a < C_a$ 时， $(p^*, q^*) = (F_a/R_a, C_a/R_a)$ 为博弈的纳什均衡点。但实际上该博弈的最优均衡点为 $(p^*, q^*) = (0, 0)$ ，即热电企业不违规，监管部门也不监管。在实践中，最优点无法达成，电力监管部门必须通过频繁的惩罚力度较大的方式才能保证热电公司在最小出力下供电，并且要随着热电企业违规程度不同实行差异化惩罚，即违规越严重，惩罚越严厉，否则会助长企业的投机行为。但热电企业数量众多，热电机组技术指标、运力等差异较大，监管的难度和成本较大，通过单纯监管的手段降低热电企业上网电量效果有限。

3. 热电企业与风电企业间的博弈分析。热电企业与风电企业作为独立运营的企业组织，其经营目标均是追求自身利益的最大化。正如上文分析，热电联产非最低出力运行造成上网电量积少成多，在区域用电量没有明显增长的大背景下，给调峰厂带来了较大的调峰压力。而出于对风电企业供电不稳定的考虑，风电上网调峰增加了电网公司调峰成本和不确定性，因此电网公司更倾向于首选热电企业供电，从而造成了大量“弃风”现象。从资源配置效率来看，风电作为利用可持续资源的发电模式，具有节省能耗、改善环境的优势，“弃风”会造成直接的资源浪费损失。从社会角度来看，热电供应所导致的“弃风”发电量可被认为社会中能源的纯损失（风电企业流动成本比重极低，而风电企业在“弃风”下的固定成本分摊可以看成是沉没成本），因为“弃风”直接导致可以替代热电的风电被无补偿地浪费，且各主体间没有环保因素的约束，造成社会成本加大。而电网公司、热电公司及风电企业作为追求利润最大化的企业，资源浪费和社会成本问题无法通过市场机制自行优化，需要政府相关部门通过新制度的设计予以解决。

热电联产整体运行复杂，不同容量机组的运行成本、收益有较大差异，电力成本、收益、利润及热电比等指标很难量化。因此，在博弈分析中，本文根据

实际情况将各企业的收益、策略等抽象化，运用抽象的数字反映彼此的关联和博弈过程。如区域整体电力需求短期未有增长，热电企业与风电企业在现行制度安排下，其电力供应是此消彼长的过程，而在缺乏监督、惩罚措施的环境下，热电公司会通过虚增热电机组容量增加发电量，以获取最大收益。直接造成的结果是“弃风”严重，考虑到风电企业的运行成本，其收益为负。从社会角度来看，相对于风电热电企业增加运力导致能源消耗和排污增加，带来社会环境的负效应。热电企业的博弈策略为“最低出力运行”和“违规”两个策略；如暂不考虑收益及风险问题，电网公司的博弈策略为“优先吸纳热电”和“优先吸纳风电”两个策略。而风电企业如果可实现充分电量上网，则获取收益；如因热压力造成“弃风”，则损失部分固定成本折旧，收益为负。可见，风电公司是否获取收益取决于电网公司是否优先吸纳风电。

为了研究方便与直观，在此忽略两个参与博弈企业的具体成本收益的多样性，将热电企业和风电企业的收益表示为抽象的数字，数字只代表收益大小程度，并没有真实的含义。

表 2 电力公司优先吸纳热电条件下的两企业博弈模型

		热电企业	
		最低出力运行	违规
风电企业	上网	-3 5	-3 8
	弃风	-2 5	-2 8

由表2可知，在电网公司优先吸纳热电企业发电且没有监督制约的制度安排下，不论风电企业选择哪种策略，热电企业选择“违规”都是最优的策略。如果热电企业并非按照最低出力运行，则所带来的电网整体调峰空间下降的部分可认为是风电企业的纯损失。同时，由于电网优先考虑热电发电，因此风电企业不管是选择上网还是选择“弃风”，都将产生损失（只是生产所产生的流动成本损失更大）。在此博弈下，（弃风和违规）为纳什均衡点。

表 3 电力公司优先吸纳风电条件下的两企业博弈模型

		热电企业	
		最低出力运行	违规
风电企业	上网	5 5	5 3
	弃风	-2 5	-2 8

由表3可知，若假设电网公司优先吸纳风电，则风电公司不会出现“弃风”现象，在此情况下，不论热

电公司选择最低出力运行还是选择违规,风电公司都会选择上网,此博弈纳什均衡点为(上网,最低出力运行),这是我们想要的博弈结果。在当前情况下存在的问题有两个,一是如何有效确定各热电机组最低出力运行的电产量,二是电力公司优先吸纳风电的潜在增加成本如何化解。因此,还要考虑如何在兼顾热电企业与风电企业双方收益、兼顾经济利益与社会利益的前提下,通过有效的制度安排解决热电企业非低出力运行问题。风电作为可持续资源,其发电在能耗节约和友好环境方面具有优势,但是无法通过市场机制得到应有补偿,如考虑这部分成本,则博弈均衡可能会发生变化。按照此思路,将热电企业的违规惩罚和社会环保成本加入博弈分析,如表4所示。

表4 综合考虑惩罚、环保成本条件下的两企业博弈模型

		热电企业	
		最低出力运行	违规
风电企业	上网	-3(4) 5(-2)	-3(4) 8(-2,-2)
	弃风	-2(4) 5(-2)	-2(4) 8(-2,-2)

如果根据情况对风电企业清洁能源使用减轻的社会成本进行补偿(补偿额为4),对热电企业能耗成本较高和违规惩罚分别给予-2、-2的惩罚,那么此博弈模型的纳什均衡点没有变化,依然是(弃风,违规)。可见,如果对热电企业收取的能源补偿、违规惩罚金额达不到影响热电企业改变策略的程度,则对当前热电企业非低出力运行问题的解决无实质影响。要从根本上解决热电企业非低出力运行问题以减少“弃风”现象,首先要保障热电企业在最低出力运行下能获取与违规情况下一致的收益。从政府的角度来说,可通过增加对风电企业给予可再生能源电价附加的比重,提高对风电企业的上网电价补贴,使其具有较大利润空间对热电企业损失进行补偿。

五、政策建议

通过博弈分析可以看出,解决热电企业非低出力运行所导致的调峰压力及“弃风”现象的根本在于现有机制、体制的优化,即通过市场机制和政府干预两种手段,在保障热电企业低出力运行及冬季供暖的前提下,自主自动地减少热电供应。根据实际情况,本文针对不同主体提出如下建议。

1. 构建以市场机制为核心的发电权交易市场。电力公司调峰问题无法根治主要源于我国电力市场还远不成熟,我国主要实施标杆电价制度,由国家发

改委制定指导定价,每个企业没有市场实力参与定价。而每个热电企业及风电企业的发电量也并非企业根据生产能力和收益自行决定,热电公司“以热定电”不参与调峰,多元的制度障碍导致调峰压力过大,“弃风”严重。根据上文的分析,根据对热电公司最低出力运行违规的抽查次数来加大对违规热电企业的惩罚,以减弱热电企业违规增加电产量的动机。但从实际效果上看,一方面监管部门的监管成本过高,且热电联产机组运行较为复杂,确定最小出力电量也存在难度。因此,应更多考虑通过市场机制对热电联产实施经济补偿,从被动“控”转为主动“减”的模式。

通过建立风电、火电替代交易机制,可考虑采取发电权证市场交易模式,即电网公司允许热电公司将多余发电权证通过市场交易方式转让给风电企业,风电企业因为获取发电权证增加发电量而增加收益,并将部分发电收益按照热电企业可接受的方案给予经济补偿。由火电企业为风电企业提供较多的发电空间,热电公司可获得协议约定的经济补偿。如果热电企业通过发电权转让所获取的收益能够与违规提高发电量的收益持平,则能减弱甚至消除其违规发电动机,从根本上解决因热电企业非低力运行所带来的调峰压力和“弃风”问题,并有助于减轻环境污染,促进区域能源结构优化。该制度设计涉及风电企业对热电企业的补偿额度,如果风电企业发电利润无法充分补偿热电企业,那么政府部门可通过增加再生能源发电补贴形式对风电公司进行适度补偿。政府管理部门也可尝试制度创新,如采取风电与热电企业间的捆绑上网,自行进行电力峰谷的调节、平衡。

2. 改变热电企业的运营与利润形成模式。国内对热电机组缺乏补贴、税收等方面的扶持政策,对热电联产企业实行的“以热定电、以电补热”的方式使得电网公司对热电企业上网电量不进行调峰。一方面,默许部分超额电量,强化了热电企业加大电力供应的动力;另一方面,热供应不具备市场定价权,导致利润不稳定甚至严重亏损。因此,解决热电企业的电供应超额问题的一个思路是减弱或取消传统热电交叉补贴的模式。保障供暖平稳是热电企业的基本职能,国家可在保障供热的基础上,采取煤炭价格补贴等方式,保障供暖企业供暖本身业务的利润,减少对发电补贴亏损的依赖。改变“以电补热”的利润构成模式,适度降低热电公司上网电价,通过降低上网

电价、减少热电企业违规,来增强发电获利的动机,降低风电对热电补偿的压力。

3. 推动风电供暖项目部分替代传统供热企业。随着技术的发展与突破,热电联产与新能源间的矛盾将发生根本改变。当前风电技术越来越成熟,风力发电成本快速下降。具预测,2020年陆上风电成本与2015年相比将下降10%,到2030年将下降24%。未来风电等新能源电力将逐渐全面替代传统热电,即节约了能源,又降低了对环境的污染,是未来我国电力系统的发展趋势。当前热电企业最低出力运行所带来的调峰问题根本在于电能无法存储。随着技术的完善,风电转化为电热供暖的技术逐渐成熟,并在实践中被应用。如吉林省有相关示范项目,通过储热式电锅炉设备存储风电,并将多余的风电转化为供暖,替代了传统燃煤锅炉,从而减轻环境污染压力,同时大量吸纳风电,取得了良好的经济效益和社会效益。从长远来看,可以推动风电供暖项目部分替代传统供热企业。采取热电锅炉替代传统热电供暖方式,将在处于用电波谷的风电用于发热并将热能进行储存,此方式可以增加电网负荷低谷的用电量,为风电并网提供负荷空间,同时减轻热电企业“以热定电”的调峰压力,提高风电吸纳能力。

六、结论

本文针对辽宁省热电企业非低出力运行带来的调峰压力和“弃风”现象,运用博弈分析方法对解决热电企业非低出力运行的策略进行分析,为解决该问题进行了制度设计思路上的探索。研究结论表明,在当前情况下,仅通过热电企业、风电企业及电网公司三主体的自发行为很难自行解决调峰压力问题,建立三者间有效的调峰激励机制是促进热电企业低出力运行进而减轻调峰压力和减少“弃风”现象的前提。

主要参考文献:

- [1] 张运洲,胡泊.“三北”地区风电开发、输送及消纳研究[J].中国电力,2012(9):1~6.
- [2] Lund H., Clark W. W.. Management of fluctuations in windpower and CHP comparing two possible Danish strategies[J]. Energy, 2002(5): 471~483.
- [3] 赵峰,李清龙,王伟.电力市场中热电联产机组两

- 部制电价机制的研究[J].电网与清洁能源,2013(6):56~60.
 - [4] 徐飞,陈磊,金和平等.抽水蓄能电站与风电的联合优化运行建模及应用分析[J].电力系统自动化,2013(1):149~154.
 - [5] 吕泉,陈天佑,王海霞等.热电厂参与风电调峰的方法评述及展望[J].中国电力,2013(11):129~136.
 - [6] 黄国栋,许丹,丁强.考虑热电和大规模风电的电网调度的研究综述[J].电力系统保护与控制,2018(15):162~170.
 - [7] CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al.. A rolling generation dispatch strategy for co-generation units domestic setting large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012(24): 21~27.
 - [8] Lv Quan, Chen Tianyou, Wang Haixia, et al.. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014(5): 79~85.
 - [9] 龙虹毓,徐瑞林,何国军等.基于热电风电协调调度的系统日调峰能力分析[J].电力自动化设备,2013(4):30~34.
 - [10] 王晓海,乔颖,鲁宗相等.供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J].中国电机工程学报,2015(9):2112~2119.
 - [11] 谢应昭,卢继平.含风储混合系统的多目标机组组合优化模型及求解[J].电力自动化设备,2015(3):18~26.
 - [12] 朱凌志,陈宁,韩华玲.风电消纳关键问题及应对措施分析[J].电力系统自动化,2011(22):121~129.
 - [13] 张国强,吴文传,张伯明.考虑风电接入的有功运行备用协调优化[J].电力系统自动化,2013(12):15~19.
 - [14] 陈建华,吴文传,张伯明等.消纳大规模风电的热电联产机组滚动调度策略[J].电力系统自动化,2012(24):21~27.
- 作者单位:1.国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院,沈阳110015; 2.国网辽宁电力有限公司,沈阳110006